Palaiseau, 16.10.2026

Recenzja dysertacji habilitacyjnej Dr. Daniela Gajdy pod tytułem

Mechanizmy kotwiczenia sieci wirów na centrach kotwiczenia oraz ich wpływ na gęstość prądu krytycznego w przewodach nadprzewodnikowych w stanie mieszanym

Zjawisko kotwiczenia wirów, kwantów indukcji magnetycznej wnikających do nadprzewodnika drugiego rodzaju jest nieodzowne dla manifestacji stanu nadprzewodnictwa. Paradoksalnie, materiał idealny bez defektów pozostanie w stanie normalnym nawet w najniższych temperaturach w wyniku zjawiska pełzania wirów. Z tego powodu mechanizm kotwiczenia przez oddziaływania wirów z defektami lub domieszkami różnej natury stanowi klucz dla zastosowań nadprzewodników w aplikacjach typu transportu energii, obiecywanych szczególnie od czasu odkrycia nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego. Obiektem i głównym celem przedstawionej dysertacji jest zjawisko kotwiczenia wirów indukcji magnetycznej w dwóch materiałach, NbTi, który jest reprezentatywnym nadprzewodnikiem niskotemperaturowym, oraz MgB_2 wielopasmowym nadprzewodniku o T_c= 39K. Ten ostatni materiał jest kandydatem do aplikacji w konstrukcji magnesów dzięki łatwej metalurgii i wysokiej wartości górnego pola krytycznego B_{2cr}.

Organizacja przedstawionego wystąpienia o habilitacje Dr. Gajdy jest jasna. Habilitant wykazał biegłość zarówno w dziedzinie badan teoretycznych jak i ich weryfikacji eksperymentalnych. Obliczenia i dopasowania zależności prądu krytycznego od pola magnetycznego są przekonywujące.

W pierwszych stronach dysertacji (sekcja 4.3.1) habilitant zamieścił krótką historię wiedzy o stanie mieszanym (nadprzewodnik drugiego rodzaju wypełnionego wirami i perspektywy zastosowań, kończąc na przypomnieniu relacji między podstawowymi parametrami nadprzewodnika, takimi jak długość koherencji, dolne pola magnetyczne B_{c1} i górne $Bc_{2,}$ a geometrią centrum kotwiczenia oraz energią kotwiczenia wirów przez defekty strukturalne.

Pierwszym znaczącym wynikiem habilitanta było wykazanie relacji między kierunkiem (orientacja) dyslokacji a efektywnością kotwiczenia wirów. Należy podkreślić ze do realizacji tych pomiarów przedstawionych w publikacjach Q1 i Q2 habilitant skonstruował dedykowany instrument pomiarowy. Następny kierunek badan habilitanta był związany z możliwością modyfikacji morfologii badanego materiału przez wygrzewanie pod wysokim ciśnieniem hydrostatycznym oraz obserwacji zmian parametrów transportu elektrycznego z tym związana. Ten eksperyment był przeprowadzony na próbkach MgB_2 a rezultaty przedstawione w publikacji Q3. Na tym etapie analizy autoreferatu, dochodzimy do projektu badan, listy celów i stosowanych metod eksperymentalnych które będą wykorzystane do realizacji planowanego programu. Kluczowym elementem planu jest możliwość produkcji próbek na platformie lokalnej laboratorium, zarówno NbTi drogą prasowania na gorąco, jak i MgB_2 metodą proszku w rurce. Próbki do badan odizolowanych centrów kotwiczenia zostały wyselekcjonowane na podstawie badan morfologii, mikrostruktury i składu materiału nadprzewodzącego.

Przełomowe wyniki eksperymentalne zostały otrzymane dzięki zastosowaniu oryginalnej, metody pomiaru prądu krytycznego, polegającej na zwiększaniu pola magnetycznego przy stałej wartości prądu płynącego przez próbkę. Spójność wyników pomiarów różnymi metodami zapewnia użycie standardowego kryterium 1μV/cm do określenia wartości prądu krytycznego. Zmodyfikowana metoda pozwoliła na identyfikacje w jednym cyklu przemiatania pola magnetycznego oddziaływania wirów z szeregiem centrów kotwiczenia. Przykładowe wyniki pomiarowe otrzymane zmodfikowaną metodą są przedstawione na stronie 14 autoreferatu.

W dalszej części dysertacji, habilitant korzysta z metody rozwiniętej przez Dew-Hughes do identyfikacji typu centrum kotwiczenia wirów. Pozwalam sobie przypomnieć ze jest to metoda empiryczna oparta na dopasowaniu normalizowanej siły kotwiczenia wirów w funkcji pola magnetycznego. Dew-Hughes zebrał wyniki dopasowania parametrów p, q i h_{max} w tablicę identyfikującą typ centrum kotwiczenia. Dalsza exploracja kotwiczenia wirów w materiale NbTi pozwoliła ujawnić pojawienie się nowego, dotąd niezidentyfikowanego centrum kotwiczenia aktywnego w wysokich polach magnetycznych 8-8.7 T. Jednocześnie przeprowadzone pomiary transportu elektrycznego wykazały słabe kotwiczenie wirów przez dyslokacje. Wyniki eksperymentów przedstawionych w publikacji Q1 są premierą światową wykazującą sukcesywne zakresy aktywności centrów kotwiczenia.

Najważniejszym osiągnieciem habilitanta w temacie kotwiczenia wirów przez dyslokacje jest wskazanie ze ich ustawienie prostopadle do zewnętrznego pola magnetycznego prowadzi do najefektywniejszego kotwiczenia sieci wirów przy indukcji magnetycznej 8T.

Kolejnym tematem badawczym rozwiniętym przez habilitanta było kotwiczenie wirów w ceramicznym MgB_2. Pomiary prądu krytycznego w tym programie były częściowo realizowane w Institute for Solid State and Research Materials w Dreźnie oraz w Instytucie Niskich Temperatur i Badan Strukturalnych PAN we Wrocławiu. W pomiarach realizowanych w tym projekcie wykorzystywano układ pomiarowy skonstruowany przez habilitanta pozwalający na pomiary prądu krytycznego w zakresie temperatur od 10 do 100K. Ponadto, dla materiału MgB_2 zostały przeprowadzone pomiary charakteryzujące krytyczne parametry nadprzewodnictwa za pomocą pomiarów transportu elektrycznego mierzonego na układzie PPMS. Równolegle przeprowadzono także analiza mikrostruktury za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego oraz Transmission Electron Microscopy TEM oraz SEM.

Nowym problemem występującym w MgB_2 jest silna reaktywność Mg z osłoną miedzianą lub monelową. Prowadzi to do niekontrolowanego tworzenia się defektów strukturalnych. Defekty te powstają w sposób przypadkowy i utrudniają analizę kotwiczenia sieci wirów. Tworzenie defektów w przewodach MgB_2 można zatrzymać stosując bariery dyfuzyjne. Wszystkie przebadane próbki MgB_2 były protegowane tymi barierami.

Wcześniejsze badania prowadzone przez habilitanta pozwoliły opracować metodę wykrywania uszkodzeń w barierze dyfuzyjnej Nb co umożliwiło prowadzenie badan nad procesem kotwiczenia sieci wirów i centrami kotwiczenia na przewodach ze szczelnymi barierami. Przeprowadzone analizy morfologii niedomieszkowanego materiału MgB_2 wykazały ze wygrzewanie próbek pod wysokim ciśnieniem hydrostatycznym może ulepszyć połączenia międzyziarnowe, zredukować ilość dużych pustych przestrzeni oraz pozwala uzyskać punktowe centra kotwiczenia wirów.

Przeprowadzone badania za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego pokazały, że obróbka termiczna pod wysokim ciśnieniem izostatycznym prowadzi do znacznej redukcji powierzchni materiału nadprzewodnikowego, ale nie wpływa na temperaturę krytyczną.

Zmniejszenie pustych regionów i zagęszczenie materiału zostało również stwierdzone w MgB_2 domieszkowanym węglem na poziomie 2%. Dalsze pomiary transportowe za pomocą układu PPMS oraz morfologii materiału za pomocą mikroskopu skaningowego wykazały ze morfologia wygrzewanego MgB_2 nabiera charakteru warstwowego. (rys 7a). Wyniki pomiarów gęstości prądu krytycznego w temperaturach 10, 20, 25 K wskazują ze wygrzewanie poprawia nieznacznie kotwiczenie. Niemniej, powyżej 25K wygrzewanie osłabia kotwiczenie.

Kolejnym ważnym osiągnieciem habilitanta jest wykazanie ze domieszki Sm_2O_3 tworzą centra kotwiczenia wirów. Jednocześnie maja one role katalityczną pozwalającą uzyskanie większej zawartości fazy nadprzewodzącej. Najważniejsza informacja w tej sekcji dysertacji jest ustalenie roli domieszki Sm_2O_3 w tworzeniu punktowych centrów kotwiczenia wirów. Stanowi ona podstawę publikacji Q4 i Q5. Stwierdzono ze wzrost intensywności kotwiczenia wirów przez domieszkowanie węglem wiąże się z wzrostem pola nieodwracalności magnetycznej B_{irr}. Z kolei centra tworzone przez domieszki Sm_2O_3 nie generują wzrostu B_{irr}. Otrzymane wyniki pokazują ze jedynie pomiary prądu krytycznego pozwalają na identyfikacje rodzajów centrów kotwiczenia wirów oraz że różne rodzaje domieszek wpływają odmiennie na morfologie Mg_2B_2, jak również na polaczenia międzyziarnowe.

Opis zastosowania metody Dew-Hughesa stosowanej do analizy siły kotwiczenia i identyfikacji centrów kotwiczenia wirów jest przedstawiony w sposób jasny i dogłębny, dostępny nawet dla badaczy nie specjalizujących się w tej technice.

Podsumowując wkład habilitanta do badan zjawiska kotwiczenia wirów w dwóch reprezentatywnych materiałach nadprzewodnikowych stwierdzam ze przedstawione wyniki stanowią duży krok do przodu w poznaniu zjawisk penetracji i kotwiczenia wirów indukcji magnetycznej. Po raz pierwszy zaobserwowano rozmaitość zachowana centrów kotwiczenia, w zależności od domieszkowania lub natury defektów. Zostało wykazane ze tworzeniu centrum kotwiczenia mogą towarzyszyć efekty wtórne jak zmiana magnetyzacji nieodwracalnej, B_{irr} lub efekt katalityczny. Stwierdzenie ze pomiar gęstości prądu krytycznego jest jedyna metoda pozwalająca na rozróżnienie typów centrów kotwiczenia wirów jest istotne, gdyż wytycza przyszła orientacje metod badawczych w kluczowej dziedzinie dla aplikacji jaka jest kontrola pełzania sieci wirów.

Dalsze pomiary transportu elektrycznego pokazały ze wygrzewanie pod wysokim ciśnieniem izostatycznym powoduje znaczne zwiększenie gęstości materiału nadprzewodzącego. Prowadzi to do zwiększenia B_{irr} o 15 % poniżej temperatury 25 K. Ten wzrost B_{irr} w temperaturze poniżej 25K wskazuje ze proces wygrzewania pod wysokim ciśnieniem hydrostatycznym tworzy nowe punktowe centra kotwiczenia wirów. Pomiary prądu krytycznego wykazały ze wygrzewanie pod wysokim ciśnieniem hydrostatycznym pozwala znacznie zwiększyć transportowa krytyczną gęstość prądu z 100 A/mm^2 do 500A/mm^2.

Porównanie dominującego mechanizmu kotwiczenia sieci wirów w temperaturze 20 K można było stwierdzić ze tworzenie centrów kotwiczenia wirów w domieszkowanych węglem przewodach MgB_2 jest związane z wzrostem B_{irr}, natomiast domieszkowanie Sm_2O_3 nie ma wpływu na Birr. Otrzymane wyniki sugerują ze różne rodzaje domieszek będą odmiennie wpływać na topologie MgB_2 w tym na polaczenia międzyziarnowe, wielkość ziaren oraz tworzenie fazy nadprzewodnikowej. Wskazuje to na czynniki utrudniające tworzenie punktowych

centrów kotwiczenia zdolnych do efektywnego kotwiczenia sieci wirów w MgB_2 w 20K.

Kluczowym tematem dysertacji pozostaje jednak mechanizm kotwiczenia wirów. W dalszym ciągu autoreferatu habilitant podjął próbę systematyzacji mechanizmów oddziaływania wirów z defektami struktury wykorzystując metody Kramera i Dew-Hughes. Te metody są oparte na analizie siły zakotwiczania oraz skalowanie w zależności siły zakotwiczania od pola magnetycznego i temperatury. Ważnym czynnikiem, który należy brać pod uwagę w tej analizie jest nieodwracalne pole magnetyczne lub pole magnetyczne w którym siłą kotwiczenia osiąga maksymalna wartość. Cytowane powyżej metody pozwalają wskazać trzy rodzaje centrów kotwiczenia: powierzchniowe, punktowe i liniowe. Interakcje między wirami i centrami kotwiczenia można również analizować na podstawie ewolucji drogi swobodnej δl i temperatury krytycznej δTc. Szczególnie ważnym kierunkiem badan habilitanta było poszukiwanie procesów generujących centra kotwiczenia i klasyfikacja tych centrów pod kątem ich aktywności w zakresie komplementarnych pól magnetycznych. Przykładem tego typu aktywności jest analiza roli domieszkowania MgB_2 przy przez Sm_20_3 i węgiel. Z jednej strony tworzone są punktowe centra kotwiczenia wirów, z drugiej strony domieszka podstawieniowa Węgla na miejscu Boru powoduje spadek $T_{c.}$

Słabym punktem opisanej powyżej metody jest fakt ze pozwala ona na analizę tylko jednego typu centrów kotwiczenia. W wypadku NbTi, który jest materiałem o dwóch stabilnych fazach: faza ß i faza a oprócz trzech faz metastabilnych prowadzi to do skomplikowanych i dotąd nie całkiem zrozumiałej interakcji między siecią wirów i centrum kotwiczenia.

W ocenie dorobku naukowego Dr. Gajdy należy podkreślić dużą liczbę publikacji zamieszczonych w czołowych pismach w dziedzinie inżynierii materiałowej. We wszystkich wybranych publikacjach (Q1-Q8) habilitant występuje jako pierwszy autor. Potwierdza to jego role jako prowadzącego projektów badawczych.

Habilitant w pełni wykorzystuje współprace międzynarodowe nie tylko do realizacji eksperymentów wymagających aparatury niedostępnej w krajowych laboratoriach, ale jak można ocenić z listy co-autorów wspólnych publikacji, świadczących o licznych aktywnych współpracach międzynarodowych w których jak można sadzić po składzie listy współautorów, habilitant aktywnie uczestniczy.

Jeden słaby punkt dysertacji to brak odnośników do istniejących, eksploatowanych urządzeń kriogenicznych służących do transportu energii elektrycznej. Brakuje tez odpowiedzi na pytanie jaka jest perspektywa wykorzystania NbTi i MgB_2 w produkcji na skale przemysłową kabli kriogenicznych. Jak już podkreślałem wielokrotnie Dr. Gajda wykazuje się dużą inicjatywą w poszukiwaniu zastosowań swoich wyników naukowych. Zastosowanie techniki wygrzewania pod wysokim ciśnieniem hydrostatycznym jest tego najlepsza ilustracja.

Żeby usytuować przedstawione wyniki naukowe Dr. Gajdy w dziedzinie kotwiczenia wirów w kontekście międzynarodowym, stwierdzam ze ilościowa analiza siły kotwiczenia i ustalenie korelacji z naturą domieszkowania są unikalne i stanowią istotny postęp w zrozumieniu mechanizmu ograniczających prąd krytyczny badanych materiałów nadprzewodzących.

W mojej opinii dorobek naukowy Dr Gajdy, przedstawiony w autoreferacie wraz z listą kluczowych publikacji, w pełni kwalifikują go do otrzymania stopnia doktora habilitowanego.

Marcin KONCZYKOWSKI
Directeur de Recherche CNRS emerite

Marcin.konczykowski@polytechnique.edu

